

## СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ, ПРОТЕКАЮЩИЕ В ПРОЦЕССЕ ФОРМИРОВАНИЯ КОМПОЗИТА НА ОСНОВЕ TiAl, УПРОЧНЕННОГО ЧАСТИЦАМИ TiB<sub>2</sub>

А.А. Кашимбетова<sup>1</sup>, М.А. Есиков<sup>1,2</sup>, Е.Д. Зыкова<sup>1</sup>

Научный руководитель: к.т.н. Д.В. Лазуренко

Новосибирский государственный технический университет,

Россия, г. Новосибирск, пр. К. Марска, 20, 630073

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН,

Россия, г. Новосибирск, пр. Лаврентьева, 15, 630090

E-mail: pavlyukova\_87@mail.ru

Разработка новых материалов для авиационных систем преобразования энергии является широко обсуждаемым вопросом в последние десятилетия. Сплавы на основе TiAl являются перспективными для применения в указанной области промышленности, поскольку отвечают многим требованиям, предъявляемым к материалам для изготовления деталей газотурбинных двигателей (высокая рабочая температура, низкий удельный вес). Сплавы такого типа демонстрируют уникальное сочетание физических, химических и механических свойств, например, высокая температура плавления, высокая прочность и жесткость, структурная стабильность, повышенная стойкость к окислению и коррозии в сочетании с низкой плотностью. Для улучшения таких свойств алюминидов титана, как сопротивление ползучести, пластичность и трещиностойкость, как правило, применяется легирование различными элементами [1]. В данной работе мы рассматриваем возможность повышения механических характеристик алюминидов титана путем формирования многослойных композитов, упрочненных керамическими частицами. Эффективность формирования многослойных композиций была показана в публикациях Vecchio и выполненных ранее работах [2, 3]. Например, трещиностойкость и усталостные свойства слоистых структур выше, по сравнению с монолитными материалами благодаря благоприятному влиянию границ раздела, которые вызывают разветвление трещин и их перезарождение в каждом новом слое. Кроме того, комбинирование разнородных слоев с существенно различающимися свойствами может обеспечить уникальное сочетание механических и эксплуатационных характеристик. Введение жестких и твердых прослоек может способствовать повышению прочности и жесткости в определенных направлениях. Цель данной работы заключалась в исследовании структурно-фазовых преобразований в процессе формирования многослойных материалов, состоящих из прослоек TiAl и TiB<sub>2</sub>.

Композиты были сформированы путем искрового плазменного спекания на установке Labox 1575. Перед спеканием заготовки, состоящие из титановых и алюминиевых фольг и порошка TiB<sub>2</sub>, помещались в титановые формы с целью предотвратить вытекание алюминия в процессе высокотемпературного воздействия. Подробное описание методики подготовки образцов дано в работе [3]. Спекание производилось в 2 этапа. На первой стадии образцы были нагреты до 830 °С и выдерживались при указанной температуре в течение 10 минут. Далее температура увеличивалась до 1250 °С, длительность нагрева составила 2 минуты. Давление варьировалось в диапазоне от 40 МПа (при 830 °С) до 10 МПа при максимальной температуре.

Структурные исследования проводились методами растровой электронной микроскопии и микрорентгеноспектрального анализа, а также с использованием просвечивающего электронного микроскопа. Фазовый состав определялся в процессе синхротронных исследований на Немецком электронном синхротроне (Deutsches Elektronen-Synchrotron, DESY), Гамбург, Германия.

Исходные заготовки представляли собой поочередно уложенные титановые и алюминиевые фольги толщиной 50 мкм. Порошок TiB<sub>2</sub> был равномерно распределен на каждом втором слое. Спекание при 830 °С привело к взаимодействию титана с алюминием и формированию соединения Al<sub>3</sub>Ti (рис. 1, а). На первом этапе алюминий был полностью истрачен на образование указанной интерметаллидной фазы. На границах раздела титана и триалюминид титана были обнаружены тонкие прослойки промежуточных соединений. Ранее было установлено [3], что данные прослойки имеют следующий состав: Ti<sub>3</sub>Al, TiAl and Al<sub>2</sub>Ti (рис. 2). Образование этих соединений свидетельствует о протекании химического взаимодействия между титаном и триалюминидом титана. Однако для окончательного перехода указанных компонент в соединение γ-TiAl целесообразным является увеличить температуру

реакции до 1250 °С. Структурные исследования образцов после высокотемпературного спекания в течение 2 минут позволили выявить, что в процессе кратковременного нагрева материалов Ti и Al<sub>3</sub>Ti прореагировали с образованием двух обогащенных титаном соединений: γ-TiAl and α2-Ti<sub>3</sub>Al (рис. 1, б). Исследования, проведенные методами растровой и просвечивающей электронной микроскопии, позволили определить, что интерметаллидная составляющая композита имела ламельную структуру.

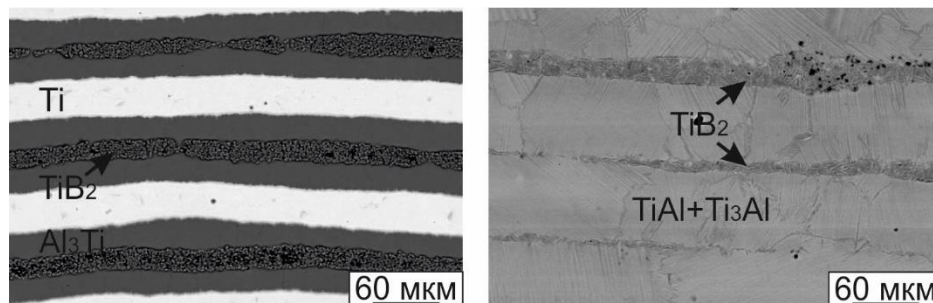


Рис. 1. Структура материала после спекания при: а – 830 °С; б – 1250 °С

Частицы TiB<sub>2</sub> претерпели рекристаллизацию в процессе спекания при 1250 °С, о чем свидетельствует модифицирование их морфологии: равноосные частицы были преобразованы в кристаллиты удлиненной формы. Однако свидетельств реакции между частицами и матрицей не наблюдалось (см. рис. 1). Исследования, проведенные методом просвечивающей электронной микроскопии, свидетельствуют о том, что керамические частицы были равномерно распределены в интерметаллидной матрице, образуя сплошной плотный слой.

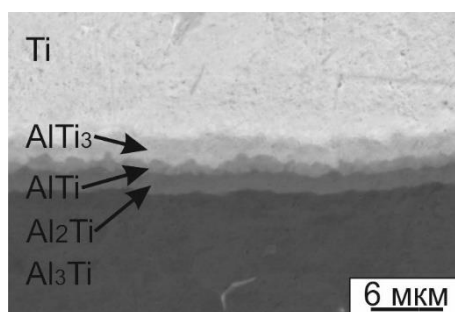


Рис. 2. Переходной слой, сформированный между Ti и Al<sub>3</sub>Ti в процессе спекания при 830 °С

*Работа была выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (Грант Президента, соглашение № 14.Z56.17.3251-МК).*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Appel F., Paul J. D. H, Oehring M. Gamma Titanium Aluminide Alloys: Science and Technology. - Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2011. – с. 465-478.
2. Vecchio K. S., Synthetic multifunctional metallic-intermetallic laminate composites // JOM. Journal of the minerals, metals and materials society. – 2005. – Vol. 57. – Iss. 3. – P. 25–31.
3. Lazurenko D.V., Mali V. I., Bataev I. A., Thoemmes A., Bataev A. A., Popelukh A. I., Anisimov A. G., Belousova N. S. Metal-Intermetallic Laminate Ti-Al<sub>3</sub>Ti Composites Produced by Spark Plasma Sintering of Titanium and Aluminum Foils Enclosed in Titanium Shells // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2015. – Vol. 46. Iss. 9. – P. 4326-4334.